

УДК 621.787:539.319

## ПРИМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ

© 2015 В. Э. Костичев

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Разработан метод динамического исследования напряжённо-деформированного состояния в деталях с концентраторами напряжений двигателя внутреннего сгорания. Данный метод позволяет учитывать повышение сопротивления усталости за счёт упрочняющей обработки, выбирать оптимальный способ поверхностного упрочнения и его режимы, разрабатывать конструкторские и технологические мероприятия, направленные на повышение характеристик сопротивления усталости деталей. Выполнена апробация разработанного метода на примере обкатки роликом цилиндрических образцов, подтверждённая экспериментальными данными. На основе металлографического анализа и рекламационных данных, выполненных на ОАО «Автодизель» (ЯМЗ), произведено исследование и определение зон разрушения коленчатого вала как наиболее нагруженной детали двигателя внутреннего сгорания в процессе эксплуатации. Средствами программного комплекса ANSYS/LS-DYNA созданы конечно-элементные модели коленчатого вала двигателя ЯМЗ-238, позволяющие оценить влияние упрочняющей обработки на сопротивление усталости под действием рабочих нагрузок и граничных условий, соответствующих реальным режимам работы двигателя ЯМЗ-238, и на область зарождения усталостных микротрещин, являющихся причиной разрушения. На основе результатов, полученных при решении производственной задачи с применением разработанной методики и подтверждённых рекламационными исследованиями, предложены конструкторские и технологические мероприятия по обеспечению требуемого уровня сопротивления усталости коленчатого вала за счёт оптимизации режимов упрочняющей обработки.

*Поверхностное пластическое деформирование, остаточные напряжения, концентратор напряжений, сопротивление усталости, динамическое моделирование, обкатка роликом, галтель.*

doi: 10.18287/1998-6629-2015-14-1-147-153

Для повышения конструкционной прочности деталей машин широко применяют различные методы упрочнения, такие как поверхностное пластическое деформирование (ППД) и химико-термическая обработка. Одним из наиболее распространённых методов ППД, используемых для повышения сопротивления усталости при производстве деталей двигателя внутреннего сгорания, является обкатка роликом или шариком. Применение этого метода позволяет повысить предел выносливости деталей на 25-40%. При обкатке роликом или шариком в поверхностном слое возникают высокие сжимающие остаточные напряжения (ОН), являющиеся ответственными за повышение сопротивления усталости деталей, особенно в условиях концентрации напряжений [1-6].

Уровень ОН в поверхностном слое детали зависит от режимов упрочняющей обработки, геометрических параметров обрабатываемой поверхности и материала заготовки. Наибольшее влияние на величину и характер распределения ОН оказывают режимы упрочняющей обработки: усилие обкатки, величина продольной и поперечной подачи [7, 8]. Достижение оптимального значения данных параметров является дорогостоящей и трудоёмкой задачей.

Отсутствие универсальной методики по оценке влияния упрочняющей обработки на сопротивление усталости при различных режимах приводит к необходимости формирования экспериментальной базы для назначения оптимальных режимов упрочнения. Однако и выполнение упрочняющей обработки на оптимальных режимах не может в полной сте-

пени обеспечить требуемый предел выносливости детали в условиях эксплуатации.

Для упрочнения коленчатого вала двигателя ЯМЗ-238 применяется метод обкатки галтельных переходов коренных и шатунных шеек роликами. Особенностью данного метода является большое

усилие обкатки (около 1кН) и отсутствие продольной подачи. Согласно актам рекламационных исследований причиной разрушения коленчатого вала ЯМЗ-238 является рост и развитие усталостных трещин. Очаг зарождения трещин в 80% случаев находится в галтельных переходах шатунных шеек (рис. 1).



Рис. 1. Излом коленчатого вала по галтели шатунной шейки

Создание требуемого уровня и характера распределения ОН в поверхностном слое галтельных переходов для обеспечения необходимого ресурса двигателя не позволяет достигать используемая на практике схема упрочнения, что является важной производственной проблемой.

Для оценки влияния упрочняющей обработки на сопротивление усталости была разработана методика динамического моделирования с применением программного комплекса ANSYS/LS-DYNA. В основе данной методики лежит моделирование упрочняющей обработки в явной постановке с учётом временного фактора. Полученное напряжённо-деформированное состояние (НДС) детали является исходным для оценки влияния ОН в поверхностном слое на растягивающие напряжения, возникающие под действием

рабочих нагрузок и являющиеся причиной роста и развития усталостных трещин.

Для проверки разработанной методики рассмотрен процесс обкатки валика диаметром 10 мм из стали 45 ( $\sigma_b = 710$  МПа,  $\sigma_T = 422$  МПа,  $\delta = 19,7\%$ ,  $\psi = 41,4\%$ ) роликом с профильным радиусом 1,6 мм [9]. За один оборот на валик был нанесён одиночный след упрочняющим роликом без продольной подачи. По результатам расчёта получено НДС валика после обкатки, с помощью которого были определены параметры кольцевого следа: ширина  $S_{упр} = 0,4$  мм и толщина упрочнённого слоя  $\delta = 0,76$  мм (табл. 1). Эти параметры были определены по распределению остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$  по толщине  $a$  поверхностного слоя одиночного следа, представленному на рис. 2.

Таблица 1. Сравнение результатов эксперимента и расчёта

Параметр	Эксперимент	Расчёт	Погрешность расчёта
Ширина кольцевого следа $S_{упр}$ , мм	0,34	0,39	14%
Толщина упрочнённого слоя $\delta$ , мм	0,71	0,76	7%

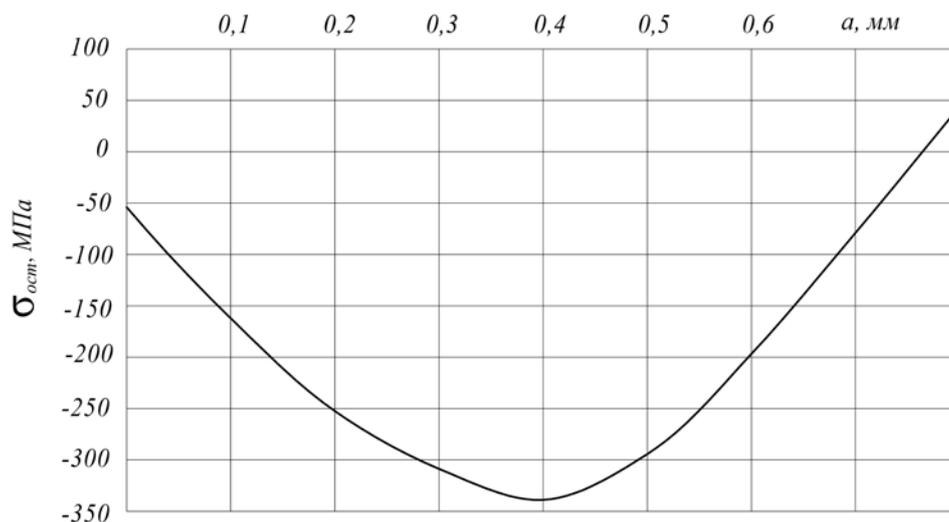


Рис. 2. Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое валика

Согласно данным работы [9], где проведено экспериментальное исследование коротких зон упрочнения, в результате упрочнения валиков с аналогичными параметрами получены следующие данные:  $S_{упр} = 0,34$  мм и  $\delta = 0,71$  мм (табл. 1).

Расхождение в 14% расчётных и экспериментальных данных по ширине кольцевого следа связано с размером конечного элемента при создании конечно-элементной модели. Более мелкое разбиение на конечные элементы даст более точный результат. Однако даже при достаточно грубом разбиении погрешность определения толщины упрочнённого слоя составляет всего 7%.

Полученные данные позволяют сделать вывод об адекватности данной модели и подтверждают возможность использования разработанного метода динамического моделирования при оценке влияния упрочняющей обработки на сопротивление усталости.

Для исследования влияния упрочняющей обработки на сопротивление усталости коленчатого вала двигателя

ЯМЗ-238 была разработана конечно-элементная модель фрагмента вала с целью моделирования процесса обкатки. В результате моделирования процесса обкатки роликами для сечения под углом  $45^\circ$  к шейке была получена расчётная эпюра остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$  по толщине  $a$  поверхностного слоя галтельного перехода коленчатого вала диаметром шейки 88 мм (рис. 3). Полученное НДС является исходным для дальнейшего анализа влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости коленчатого вала.

Последующие расчёты заключались в уточнении граничных условий, соответствующих реальному циклу работы коленчатого вала в двигателе. Давление газа в камере сгорания определялось зависимостью усилия от времени, передаваемого на шатунную шейку через шатун. Вращение модели коленчатого вала осуществлялось с учётом трения в подшипниках скольжения. В результате расчётов было получено НДС коленчатого вала от воздействия рабочих нагрузок с учётом остаточных напряжений (рис. 4).

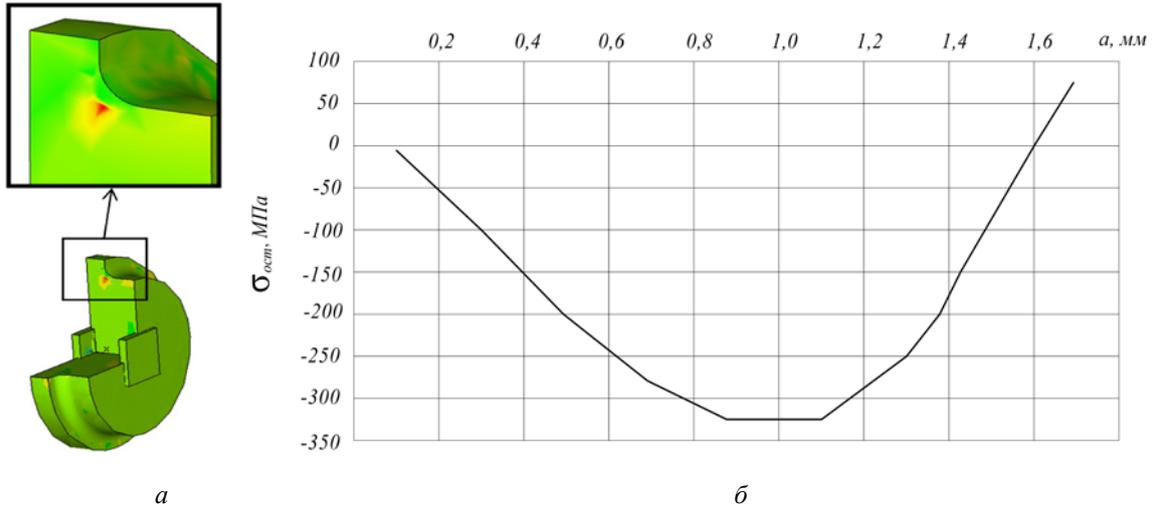


Рис. 3. НДС фрагмента коленчатого вала после обкатки роликами (а) и распределение ОН (б) по толщине поверхностного слоя галтельного перехода в сечении под углом 45° к шейке

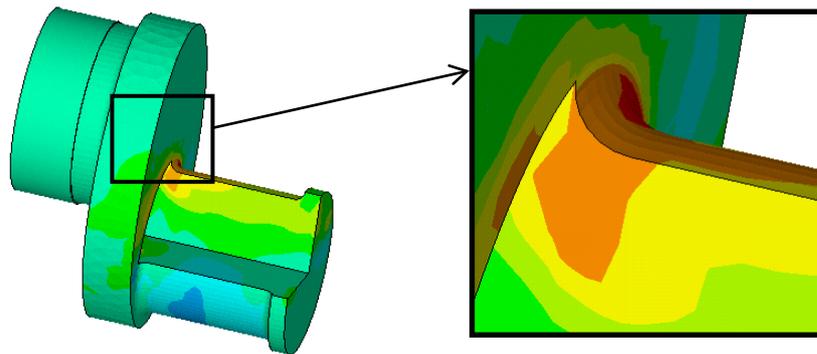


Рис. 4. НДС коленчатого вала под действием рабочих нагрузок

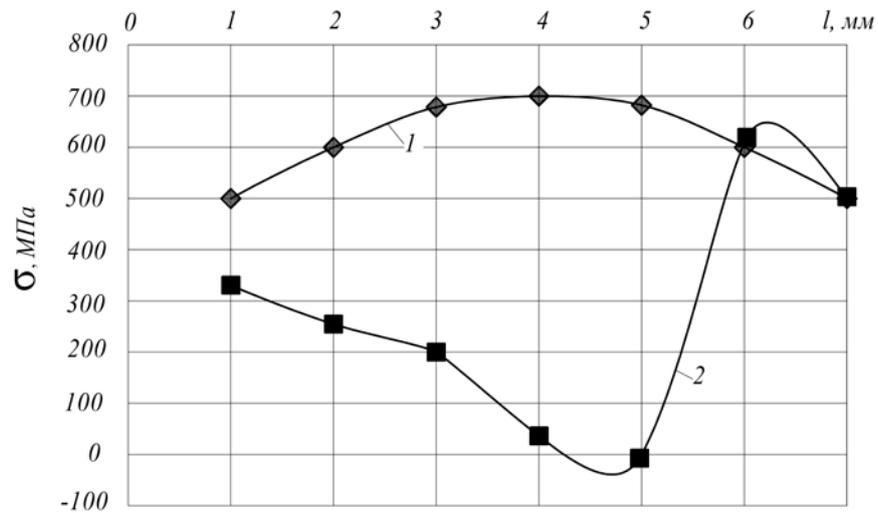


Рис. 5. Распределение напряжений по поверхности профиля галтельного перехода: 1 – без упрочнения, 2 – с упрочнением

Сравнение данных металлографического анализа показало взаимосвязь результатов расчётов с экспериментальными исследованиями по анализу зон зарождения микротрещин, являющихся причиной разрушений. В результате расчётов было получено распределение нормальных напряжений  $\sigma$  по поверхности профиля галтельного перехода  $l$  (рис. 5), на основании которого можно сделать вывод о влиянии упрочняющей обработки на растягивающие напряжения, возникающие под действием рабочих нагрузок. Из данных рис. 5 видно, что упрочнение роликами приводит к существенному снижению растягивающих напряжений на поверхности профиля галтельного перехода коленчатого вала.

Разработанная расчётная модель позволяет определить участки концентрации растягивающих напряжений и соответствующие им очаги зарождения усталостных трещин, а также сделать заключение о рациональности применяемых способов и режимов упрочняющей обработки.

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о необходимости

корректировки процесса обкатки галтельных переходов роликом ввиду малой зоны упрочнения и, следовательно, увеличения зоны упрочнения в сторону цилиндрической части, что имеет теоретическое подтверждение в работе [9].

Таким образом, разработанный динамический метод исследования напряжённо-деформированного состояния в концентраторах напряжений деталей двигателей внутреннего сгорания позволяет:

– учитывать повышение сопротивления усталости за счёт упрочняющей обработки при анализе НДС деталей под воздействием рабочих нагрузок;

– осуществлять выбор способа упрочнения и оптимизацию режимов упрочняющей обработки по допускаемым технологическим остаточным деформациям;

– уточнять локализацию зарождения дефектов в концентраторах напряжений с учётом упрочнённого поверхностного слоя и разрабатывать конструкторские и технологические мероприятия, направленные на повышение сопротивления усталости деталей.

### Библиографический список

1. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. 1986. № 8. С. 29-32.

2. Павлов В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали // Известия вузов. Машиностроение. 1988. № 8. С. 22-26.

3. Радченко В.П., Афанасьева О.С. Методика расчёта предела выносливости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений при температурных выдержках в условиях ползучести // Вестник СамГТУ. Серия: Физ.-мат. науки. 2009. № 2 (19). С. 264-268.

4. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. Самара: СНЦ РАН, 2012. 125 с.

5. Вакулюк В.С. Сопротивление усталости детали в зависимости от толщины упрочнённого слоя при опережающем поверхностном пластическом деформировании // Вестник СГАУ. 2012. № 3 (34), часть 3. С. 172-176.

6. Иванов С.И., Павлов В.Ф., Минин Б.В., Кирпичёв В.А., Кочеров Е.П., Головкин В.В. Остаточные напряжения и сопротивление усталости высокопрочных резьбовых деталей. Самара: СНЦ РАН, 2015. 171 с.

7. Белозеров В.В., Махатилова А.И., Туровский М.Л., Шифрин А.М. Остаточ-

ные макронапряжения при обкатывании без продольной подачи // Вестник машиностроения. 1986. № 10. С. 59-61.

8. Букатый А.С. Обеспечение точности изготовления деталей после упрочнения поверхностным пластическим деформированием // Сборник статей IV Международной научно-технической конференции «Проблемы исследования и проекти-

рования машин». Пенза: Приволжский Дом знаний, 2008. С. 24-26.

9. Павлов В.Ф., Столяров А.К., Вакулюк В.С., Кирпичёв В.А. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям. Самара: СНЦ РАН, 2008. 124 с.

### Информация об авторе

**Костичев Владислав Эдуардович**, аспирант кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный ис-

следовательский университет). E-mail: [thourvald@mail.ru](mailto:thourvald@mail.ru). Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

## APPLICATION OF DYNAMIC MODELING TO THE EVALUATION OF INFLUENCE OF STRENGTHENING TREATMENT ON FATIGUE RESISTANCE

© 2015 V. E. Kostichev

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

A method of dynamic analysis of a strain-stress state in parts of an internal-combustion engine with stress concentrators has been worked out. The method gives an opportunity to take into account the rise of the fatigue resistance due to strengthening treatment, to choose the optimal mode of surface hardening and its regimes, to develop the technological and designing activities aimed at improving the fatigue resistance characteristics of the parts. The method has been tested drawing on the example of rolled cylindrical specimens, the results have been confirmed by experimental data. Failure zones of the crankshaft as the most strained part of a combustion engine in the operation process have been investigated and determined on the basis of metallographic analysis and reclamation data carried out at the Open Joint-Stock Company "Auto diesel" (YMZ). Finite-element models of the engine YMZ-238 crankshaft have been constructed using the ANSYS/LS-DYNA software complex. The models make it possible to evaluate the influence of hardening on the fatigue resistance under operating loads and boundary conditions corresponding to the real working regimes of the YMZ-238 engine and the area of initiation of fatigue macro cracks causing the destruction. On the basis of the results obtained in solving a production problem using the proposed method and confirmed by the reclamation analysis designing and technological activities aimed at ensuring the required level of crankshaft fatigue resistance due to the optimization of hardening treatment regimes have been proposed.

*Surface plastic deformation, residual stresses, stress concentrator, fatigue resistance, dynamic modeling, rolling, fillet.*

### References

1. Pavlov V.F. On connection between residual stresses and endurance limit under bending under stresses concentration conditions. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 1986. №8. P. 29-32. (In Russ.)
2. Pavlov V.F. Residual stresses in the part with a concentrator surface layer value and distribution influence on endurance limit.

Report 1. Solid parts. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 1988. №8. P. 22-26. (In Russ.)

3. Radchenko V.P., Afanacieva O.S. Calculation Procedure of a Fatigue Point for Strengthened Cylindrical Specimen with Pressure Concentrators at Temperature Endurances in the Creep Conditions. *Vestnik SamGTU. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki*. 2009. №2 (19). P. 264-268. (In Russ.)

4. Pavlov V.F., Kirpichev V.A., Vakulyuk V.S. *Prognozirovanie soprotivleniya ustalosti poverkhnostno-uprochnennykh detaley po ostatochnym napryazheniyam* [Prediction of fatigue resistance of surface-hardened parts by residual stresses]. Samara: Samarskiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2012. 125 p.

5. Vakulyuk V.S. The dependence of detail fatigue resistance on the thickness of hardening layer under outstripping superficial plastic deforming. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2012. №3 (34), part 3. P. 172-176. (In Russ.)

6. Ivanov S.I., Pavlov V.F., Minin V.B., Kirpichev V.A., Kocherov E.P., Golovkin V.V. *Ostatochnye napryazheniya i*

*soprotivlenie ustalosti vysokoprochnykh rez'bovykh detaley* [Residual stresses and fatigue resistance of high-strength threaded parts]. Samara: Samarskiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2015. 171 p.

7. Belozyorov V.V., Makhatilova A.I., Turovsky M.L., Shifrin A.M. Residual macrostresses under rolling without longitudinal supply. *Russian Engineering Research*. 1986. V. 6, no. 10. P. 59-61.

8. Bukaty A.S. Ensuring parts manufacture accuracy after hardening by superficial plastic deforming. *Proceedings of the IV International Scientific Technical Conference «Problems of machines investigation and designing»*. Penza: Privolzhskiy Dom znaniy Publ., 2008. P.24-26. (In Russ.)

9. Pavlov V.F., Stolyarov A.K., Vakulyuk V.S., Kirpichev V.A. *Raschet ostatochnykh napryazheniy v detalyakh s kontsentratorami napryazheniy po pervonachal'nym deformatsiyam* [Calculation of residual stresses in parts with stress concentrators by initial deformations]. Samara: Samarskiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2008. 124 p.

#### About the authors

**Kostichev Vladislav Edouardovich**, postgraduate student of the Department of Strength of Materials, Samara State Aero-

space University, Samara, Russian Federation. E-mail: [thourvald@mail.ru](mailto:thourvald@mail.ru). Area of Research: mechanics of residual stresses.